



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A
BIOMECHANIKY**

INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND BIOMECHANICS

**REDESIGN KONSTRUKCE A ŘÍZENÍ NESTABILNÍHO
ROBOTA SE SFÉRICKOU ZÁKLADNOU**

REDESIGN OF THE CONSTRUCTION AND CONTROL ALGORITHM FOR AN UNSTABLE
ROBOT WITH A SPHERICAL BASE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Vlastimil Novák

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Tomáš Spáčil

BRNO 2020

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky
Student: **Vlastimil Novák**
Studijní program: Aplikované vědy v inženýrství
Studijní obor: Mechatronika
Vedoucí práce: **Ing. Tomáš Spáčil**
Akademický rok: 2019/20

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Redesign konstrukce a řízení nestabilního robota se sférickou základnou

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

V předchozích letech vznikl v mechatronické laboratoři nestabilní balancující robot se sférickou základnou, též známý jako ballbot. Cílem studenta je odstranit konstrukční a senzorické nedostatky robota, které byly identifikovány během dřívějšího provozu. Mezi tyto nedostatky patří především optimalizace konstrukce pro umístění optical flow senzoru a zvýšení její robustnosti.

Cíle bakalářské práce:

- 1) Analyzujte současnou konstrukci a optimalizujte ji s cílem dosažení vyšší robustnosti a možnosti umístění nových senzorů (optical flow, encodery).
- 2) Navrhněte a vyrobte novou konstrukci robota metodou aditivní výroby nebo obráběním.
- 3) Robota sestavte a zprovozněte s dostupnou elektronikou.
- 4) Do řídicího algoritmu integrujte nové senzory a ověřte jejich funkcionalitu.

Seznam doporučené literatury:

VALÁŠEK, Michael. Mechatronika. Dot. 1. vyd. Praha: České vysoké učení technické, 1996. ISBN 80-01-01276-X.

ZÁHLAVA, Vít. Návrh a konstrukce desek plošných spojů. Vyd. 1. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2005. ISBN 80-01-03351-1.

SKALICKÝ, Jiří. Teorie řízení 1. Vyd. 1. Brno: Vysoké učení technické, 2002. Učební texty vysokých škol. ISBN 80-214-2112-6.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2019/20

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá redesignem nestabilního robota se sférickou základnou, zkráceně nazývaného Ballbot. Cílem práce je zanalyzovat existující konstrukční prvky robota, dostupnou senzoriku, řídicí a výkonovou elektroniku a identifikovat funkční nedostatky. Následně navrhnout řešení a realizovat odstranění všech nalezených nedostatků.

Součástí práce je testování revidované verze robota, které, mimo jiné, obsahuje prověření funkčnosti jednotlivých senzorů a jejich komunikace s řídicím mikrokontrolerem. Důraz je kladen na stanovení reálné přesnosti snímání nově použitých senzorů v závislosti na použitém nastavení a okolních podmínkách.

Abstract

This bachelor thesis deals with the redesign of an unstable robot with spherical base, also known as Ballbot. The aim of the work is to analyze the existing structural elements of the robot, available sensors, control and power electronics and identify functional deficiencies. Subsequently, design a solution and implement it in order to eliminate all found deficiencies.

Part of the work is testing a revised version of the robot, which, among other things, consists of checking the functionality of individual sensors and checking the communication between sensors and microcontroller. Emphasis is placed on determining the real accuracy of newly used sensors depending on the settings used and ambient conditions.

Klíčová slova

ballbot, robot, konstrukce, redesign, elektronika, optical flow senzor, magnetický enkodér, Matlab, Simulink

Keywords

ballbot, robot, construction, redesign, electronics, optical flow sensor, magnetic encoder, Matlab, Simulink

Bibliografická citace

NOVÁK, Vlastimil. *Redesign konstrukce a řízení nestabilního robota se sférickou základnou*. Brno, 2020. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/125473>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky. Vedoucí bakalářské práce Ing. Tomáš Spáčil.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma „Redesign konstrukce a řízení nestabilního robota se sférickou základnou“ vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který tvoří přílohu této práce.

V Brně, dne 17. června 2020

.....

Vlastimil Novák

Poděkování

Děkuji Ing. Tomáši Spáčilovi a týmu z Mechlabu za cenné rady a vedení při vypracování mé bakalářské práce. Dále děkuji své rodině za podporu během studií a Lucii Novákové za nalezení Ernesta.

Vlastimil Novák

Obsah

| | |
|---|----|
| 1. Úvod..... | 9 |
| 2. Rešerše | 10 |
| 2.1. Nestabilní roboti se sférickou základnou..... | 10 |
| 2.1.1. Existující provedení ballbotů | 12 |
| 2.2. Analýza předchozí verze Ballbota | 13 |
| 2.2.1. Konstrukční části..... | 13 |
| 2.2.2. Elektronické části | 14 |
| 2.3. Optical flow senzory..... | 15 |
| 2.3.1. ADNS 3080 | 16 |
| 2.4. Softwarová komunikace a programování | 16 |
| 3. Cíle řešení..... | 18 |
| 4. Postup řešení a výsledky | 20 |
| 4.1. Návrh a výroba konstrukce robota..... | 20 |
| 4.1.1. Základna | 21 |
| 4.1.2. Osazení optical flow senzoru | 22 |
| 4.1.3. Interface panel a ochranný kryt..... | 22 |
| 4.2. Elektronika..... | 24 |
| 4.2.1. Řídící elektronika | 24 |
| 4.2.2. Enkodéry | 25 |
| 4.2.3. Akumulátory..... | 25 |
| 4.3. Testování senzorů | 26 |
| 4.3.1. Optical flow senzor ADNS 3080 | 26 |
| 4.3.2. Porovnání dat z optical flow senzoru s daty z enkodérů | 31 |
| 4.3.3. Integrace senzorů v prostředí Simulink..... | 32 |
| 5. Závěr..... | 33 |
| 6. Seznam použitých zdrojů | 35 |
| 7. Seznam použitých zkratk a symbolů | 37 |
| 8. Seznam elektronických příloh..... | 38 |

1. Úvod

Nestabilní roboti se sférickou základnou, též nazývaní ballboti, jsou jedním z představitelů balancujících úloh. Mezi další balancující úlohy patří například inverzní kyvadlo nebo balancující vozidlo typu Segway. Základem těchto úloh je měření úhlů natočení vůči centrální ose a odpovídající reakce na jejich změnu. Oproti výše zmíněným úlohám má však ballbot více stupňů volnosti, tudíž nároky na přesnost a rychlost snímání úhlů natočení jsou vyšší.

Z důvodu větších nároků na řízení soustavy a jistým konstrukčním překážkám nejsou zatím roboti typu ballbot příliš rozšířeni. V budoucnu mohou však díky své vysoké agilitě najít uplatnění v mnoha odvětvích průmyslu, a to především na pozicích, kde je žádoucí interakce s lidmi.

Tato bakalářská práce navazuje na předchozí bakalářské práce, které se zabývaly návrhem nestabilního robota se sférickou základnou v mechatronické laboratoři Ústavu mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky na Fakultě strojního inženýrství VUT v Brně. Při předchozím provozu robota byly identifikovány jisté senzorické a konstrukční nedostatky. Cílem této práce je zrevidovat celého robota a provést úpravy jednotlivých částí za účelem odstranění nedostatků. Zadání vyžaduje znalost více technických oborů a multidisciplinární přístup, aby bylo dosaženo synergického efektu. Jedná se tedy o typicky mechatronickou úlohu.

2. Rešerše

V první části této kapitoly je představena základní koncepce balancujících robotů se sférickou základnou. Jsou zde rozebrány typické prvky konstrukce robota a existující provedení ballbotů s jejich přednostmi a nedostatky. Druhá část rešerše se věnuje analýze předchozí verze Ballbota. Nachází se zde popis konstrukčních a elektronických částí robota, který tvoří základ pro identifikaci nedostatků a formulaci dalšího postupu v kapitole 3. Další podkapitola se zabývá optical flow senzory. Jsou zde zmapovány možnosti provedení optické detekce pohybu a následně je zde představen vybraný senzor. Poslední část se věnuje použitým softwarovým nástrojům pro programování a komunikaci s Ballbotem.

2.1. Nestabilní roboti se sférickou základnou

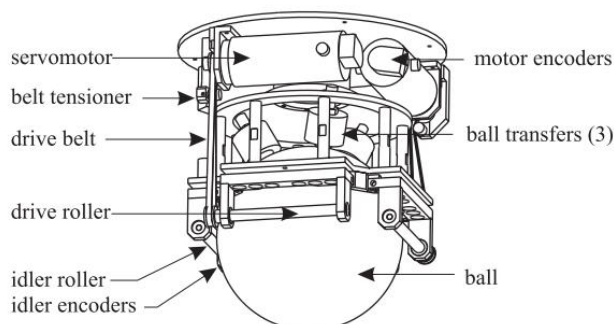
V dnešní době se neustále zvyšuje poptávka po univerzálních mobilních robotech, kteří by zvládli vykonávat širokou škálu úkonů v prostředí původně navrženém pro lidi. Robot musí být schopen v takovémto prostředí rychle reagovat na nepředvídatelné okolnosti, způsobené přítomností člověka. To v praxi přináší řadu komplikací. Moderní humanoidní roboti s končetinami mají mnoho stupňů volnosti a jejich návrh je po všech stránkách velmi náročný. Konvenční (staticky stabilní) roboti nemusí vynakládat energii, aby zůstali ve vzpřímené poloze. Jejich návrh a řízení jsou relativně jednoduché. Fakt, že tito roboti aktivně nebalancují, aby zůstali ve vzpřímené poloze, je činí náchylnějšími k převrnutí. Zvedání břemen a zrychlení vyvíjejí na konstrukci robota točivé momenty, které nejsou ničím aktivně kompenzovány. Moderní, staticky stabilní roboti mají velkou základnu a omezené manévrovací schopnosti, což způsobuje komplikace při interakci s lidmi a při navigování stísněnými prostory, například dveřmi.

Alternativním řešením jsou nestabilní roboti. Ti aktivně a neustále vydávají energii, aby zůstali ve vzpřímené poloze, ale nepotřebují velkou základnu, aby udrželi stabilitu. Díky tomu může být jejich konstrukce vysoká a štíhlá, ale přitom není omezena jejich akcelerace ani agilita. [1]

Nestabilní roboti se sférickou základnou (zkráceně ballboti) aktivně balancují, jak název napovídá, na jedné základně kulovitého tvaru. Pomocí sady kol přenášejí na sférickou základnu točivé momenty a tím udržují celou soustavu ve vzpřímené poloze. Toto řešení umožňuje rychlý pohyb a natočení robota do libovolného směru, což dělá z ballbota ideální platformu pro interakci s lidmi. V současnosti existují tři základní způsoby přenášení točivého momentu na sférickou základnu:

Inverse Mouse-ball Drive (IMB) – Jedná se o vývojově starší způsob. Byl využit při konstrukci historicky prvního ballbota (CMU Ballbot v roce 2005). Vychází z principu funkce starých kolečkových počítačových myší. Po obvodu koule jsou umístěny čtyři rolny. Dvě z nich jsou pomocí rozvodových řemenů připojeny k motorům. Rolny svým pohybem přenášejí točivý moment na kouli a tím ji uvádějí do pohybu. Nevýhodou tohoto řešení je, že rolny, které jsou rovnoběžné ke směru pohybu musí

po povrchu koule prokluzovat. Současné nároky na vysoký koeficient tření mezi rolnou a koulí a možnost prokluzu způsobují vyšší opotřebení všech částí pohonu. [2] Tento problém byl odstraněn v následujícím řešení.



Obr. 2.1: Ukázka mechanismu Inverse Mouse-ball Drive (převzato z [2])

Omnidirectional Wheel Drive System – Využívá speciálních kol tzv. omniwheels¹. Zjednodušeně řečeno se jedná o kola, která mají po svém obvodu umístěny soudečkové rolny. Díky nim se může kolo pohybovat v axiálním směru prakticky bez tření. Počet řad i úhel uložení valivých elementů se odvíjí od konkrétní aplikace. Typická konstrukce ballbota má tři omniwheel kola rozmístěná po 120 stupních, která volně sedí na vrchní části sférické základny. [3]



Obr. 2.2: Model mechanismu Omnidirectional Wheel Drive System (vlevo, převzato z [4])
ukázka kola typu omniwheel (vpravo, převzato z [5])

Spherical Induction Motor (SIM) – Tento způsob se od předchozích výrazně liší. Nepochází zde totiž k mechanickému přenosu točivého momentu na kouli. Sférická základna je dutá ocelová koule s povrchovou vrstvou mědi. Okolo základny je rozmístěno šest statorových vinutí. Každé vinutí je součástí malého třífázového motoru. Výsledná konstrukce je po mechanické stránce velice jednoduchá. Obsahuje totiž pouze jednu pohybující se součástku. Oproti předchozím způsobům je však zatím toto provedení energeticky nevhodné a maximální točivý moment je při srovnatelných rozměrech menší.[1]

¹ Český překlad neexistuje

2.1.1. Existující provedení ballbotů

CMU Ballbot – Je první funkční ballbot. Byl vyvinut profesorem Ralphem Hollisem na Carnegie Mellon University Pittsburgh, USA v roce 2005. Robot vzniknul jako platforma pro výzkum dynamicky balancujících robotů na jedné sférické základně. Cílem bylo vytvořit robota lidské konstituce, který je schopen pohybu ve stejném prostředí jako člověk. Robot využívá k pohybu princip Inverse Mouse-ball Drive (princip funkce popsán výše).[2]

SIMBOT – Jedná se o vylepšenou verzi CMU Ballbota. Byl vyvinut týmem vědeckých pracovníků kolem profesorů Ralpha Hollise a Masaaki Kumagaie na Carnegie Mellon University Pittsburgh, USA v roce 2016. Tělo robota je shodné s CMU Ballbotem, došlo však k výměně starého způsobu pohonu za revoluční SIM motor. Jedinou pohyblivou součástí konstrukce je ocelová sférická základna. SIMBOT se dokáže pohybovat stejně rychle jako jeho předchůdce, ale energetická náročnost je přibližně dvojnásobná. Pozornost je aktuálně soustředěna na zlepšení vlastností SIM pohonu. Robot je také nadále využíván k výzkumu možností integrace balancujících robotů do každodenních lidských činností.[1]

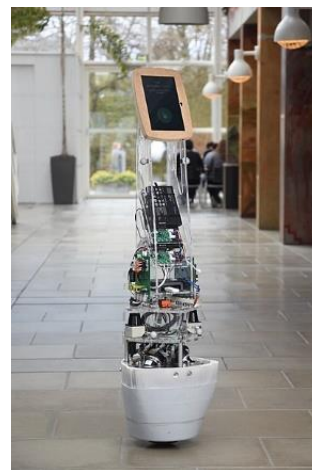
KUGLE – Je zástupcem Omnidirectional Wheel Drive System ballbotů. Byl vyvinut Thomasem Kølbæk Jespersenem na University of Aalborg, Dánsko v roce 2019. Hlavním přínosem tohoto robota je nový přístup k řešení matematického modelu soustavy. Většina stávajících modelů soustav jsou rovinné modely odvozené pomocí Eulerových úhlů. Matematický model KUGLE je odvozen pomocí kvaternionů, což poskytuje přesnější a výpočetně méně náročný model soustavy (více viz. [3]).



CMU Ballbot [6]



pohon SIM [1]



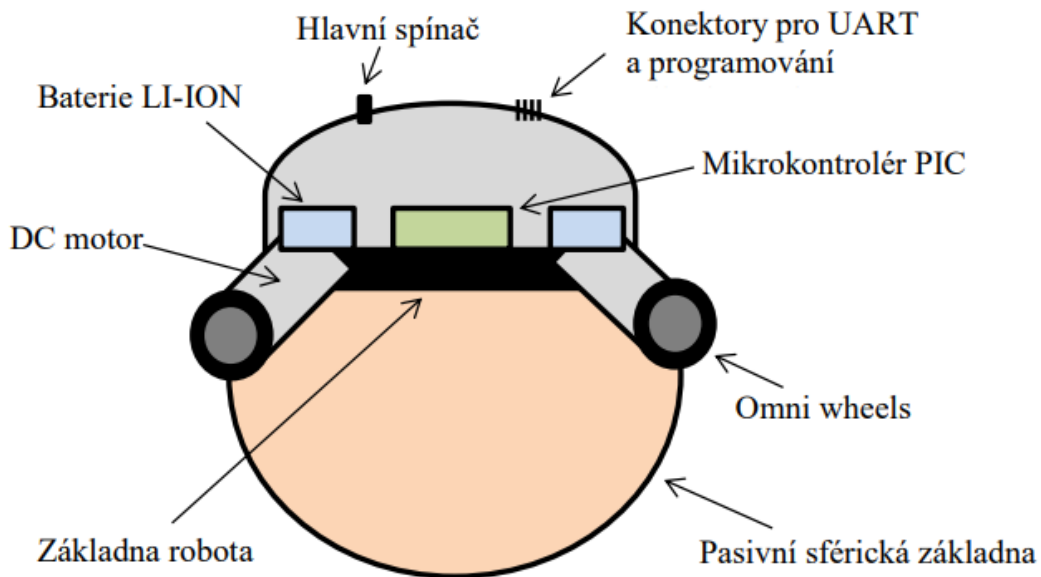
Kugle Ballbot [7]

Obr. 2.3: Ukázky provedení ballbotů

Mezi další zástupce patří: **TGU Ballbot** profesora Masaaki Kumagaie, **REZERO** Pétera Frankhausera a Corsina Gwerdera a **BB-8** replika od xrobots.co.uk. Tito roboti jsou podrobněji popsáni v [8].

2.2. Analýza předchozí verze Ballbota

Robot byl skladován rozložený na jednotlivé díly, proto byla prvním krokem při analýze původní verze Ballbota inventarizace všech dostupných součástí. Všechny důležité komponenty byly nalezeny až na finální verze enkodérů AS5147, navržených Bc. Tomášem Kirchnerem. K dispozici byly pouze původní, nevyhovující magnetické enkodéry s hallovými sondami a zkušební verze DPS s osazenými enkodéry MLX90363 a AS5048A.



Obr. 2.4: Nákres původní verze Ballbota (pozn. není v měřítku, převzato z [9])

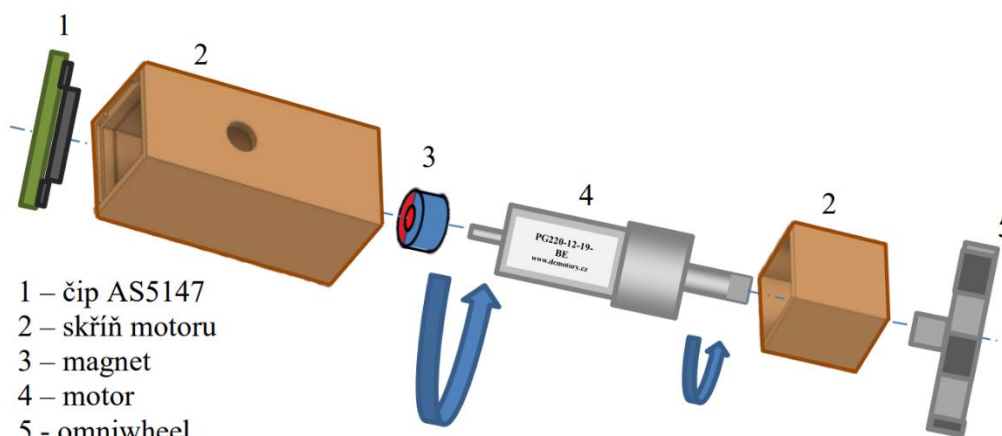
Laboratorní Ballbot využívá k přenosu točivého momentu na sférickou základnu Omnidirectional Wheel Drive System (kap. 2.1). Oproti většině stávajících ballbotů je však poměr velikosti těla robota ku sférické základně výrazně menší. To spolu s nižší hmotností a momentem setrvačnosti ovlivňuje dynamiku celé soustavy.

2.2.1. Konstrukční části

Základna – Hlavní nosný prvek konstrukce robota je vyroben z PLA plastu metodou aditivní výroby. Jedná se o desku kruhového tvaru s profily na upevnění motorových klecí a s dilatačními otvory lichoběžníkového tvaru. (viz. Obr. 4.1)

Pohonná jednotka včetně motorové klece osazení enkodérů - Použitý DC motor PG220 svými parametry vyhovuje definovaným požadavkům. Dostatečná obvodová rychlost a točivý moment jsou dosaženy pomocí 19:1 planetové převodovky, která je dodávána s motorem. Uchycení motorů je řešeno pomocí dvou do sebe zapadajících krytů. Přední kryt je přišroubován k přední části planetové převodovky, zadní kryt se nasouvá přes zadní část motoru a překrývá přední kryt. Spojení krytů je řešeno lepeným spojem. V zadní části krytu je drážka pro uložení DPS enkodéru. Motorová klec

je uchycena k základně pomocí dvou šroubů umístěných v jedné ose na bocích zadního krytu. K výstupní hřídeli převodovky je pomocí zakázkově vyrobeného spojovacího komponentu připojeno dvouřadé kolo typu omniwheel.



Obr. 2.5: Celkové uložení soustavy motoru (převzato z [9])

Ochranný kryt (Obr. 4.3) – Chrání veškeré prvky elektroniky před mechanickým poškozením. V jeho vrchní části jsou umístěny konektory pro programování a komunikaci s mikrokontrolerem a hlavní spínač. Kryt je připevněn k základně pomocí plastového prstence. Ten je vyroben z několika navzájem slepených částí. Spoje s krytem a základnou jsou také lepené. [8]

2.2.2. Elektronické části

Řídící elektronika (Obr. 4.4) – Hlavním řídicím členem je mikrokontroler dsPIC33FJ128MC804. Čip je usazen uprostřed DPS řídicí elektroniky a jednotlivé piny jsou vyvedeny na pinové lišty po okrajích DPS. Na vstupních pinech čipu jsou umístěny RC filtry. K DPS je připojena IMU, která komunikuje s mikrokontrolerem pomocí rozhraní I2C. Pevný spoj IMU zamezuje vznik případného offsetu v průběhu pohybu.

Akumulátory – Použité články Li-Ion 18650 jsou zapojené v 0P6S uspořádání. Články jsou po dvojicích umístěny po obvodu základny, v prostorech mezi profily na uchycení motorových klecí. Ve zmíněném zapojení jsou články schopné operovat v rozmezí 25.2 V -16.5 V.

Výkonová elektronika – Zajišťuje napájení řídicí elektroniky, senzoriky a motorů. Napětí z baterií je sníženo na úroveň 12V (pozn. pracovní napětí motorů PG220) pomocí spínaného regulátoru TPS5430. Lineární regulátor LM7805 poskytuje 5V napájení pro senzory a pro regulátor MCP1703. Ten poskytuje 3.3V napájení pro mikrokontroler. K řízení motorů je vyžit H-můstek DRV8870 s integrovanou tepelnou ochranou. [10]

Podrobnější informace k původním částem Ballbota viz. [8],[9],[10].

2.3. Optical flow senzory

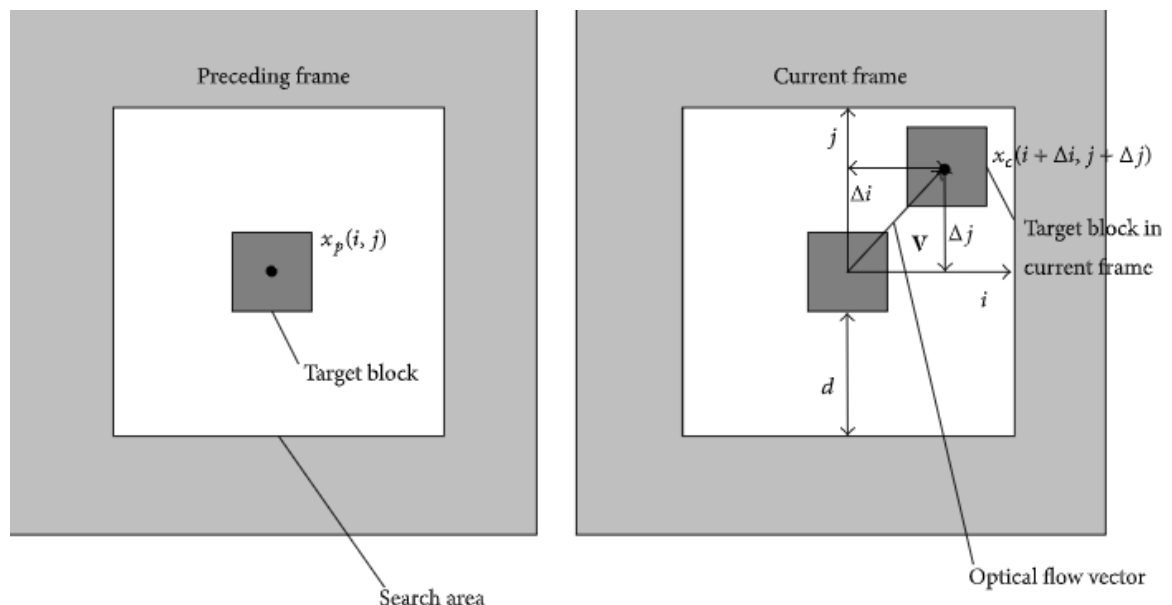
Slouží k lokalizaci robota v prostoru. Existují dva typy lokalizace, relativní a absolutní.

Relativní lokalizace je výpočetně a časově méně náročná. Aktuální pozice robota je učena pomocí znalosti předešlé pozice a rychlosti pohybu. Tento typ lokalizace je typicky realizován pomocí enkodérů umístěných na kolech nebo motorech robota. Díky nepřesnostem senzoru, prokluzu kol, nerovnosti povrchu a podobným problémům dochází ke vzniku kumulativní chyby měření. K odstranění této chyby je třeba do soustavy integrovat další lokalizační systém.

Absolutní lokalizace určuje polohu robota podle významných bodů v okolí, vysílačů nebo satelitního signálu. Při tomto typu lokalizace nevzniká kumulativní chyba měření. Nevýhodou je však složitější realizace (nutnost satelitů, vysílačů apod.) a větší časová náročnost. [11]

Optical flow senzor se využívá v systémech absolutní lokalizace. Může být využit například jako sekundární systém k doplnění pokročilejších systémů (GPS, radiolokace), nebo jako systém pro detekci chyby při měření pozice pomocí enkodérů (případ laboratorního Ballbota). Dalším častým využitím je snímání pohybu počítačové myši.

Princip funkce senzoru tkví v porovnávání snímků povrchu v okolí robota. Čip je schopen pořizovat snímky v rychlém sledu (stovky až tisíce snímků za vteřinu), ale v malém rozlišení (desítky až stovky pixelů). Snímky jsou zpracovávány jedním z mnoha specializovaných algoritmů (výčet algoritmů uveden v [12]). Často používaný je tzv. Block Matching Algorithm (BMA), který funguje na principu absolutní sumy rozdílů.



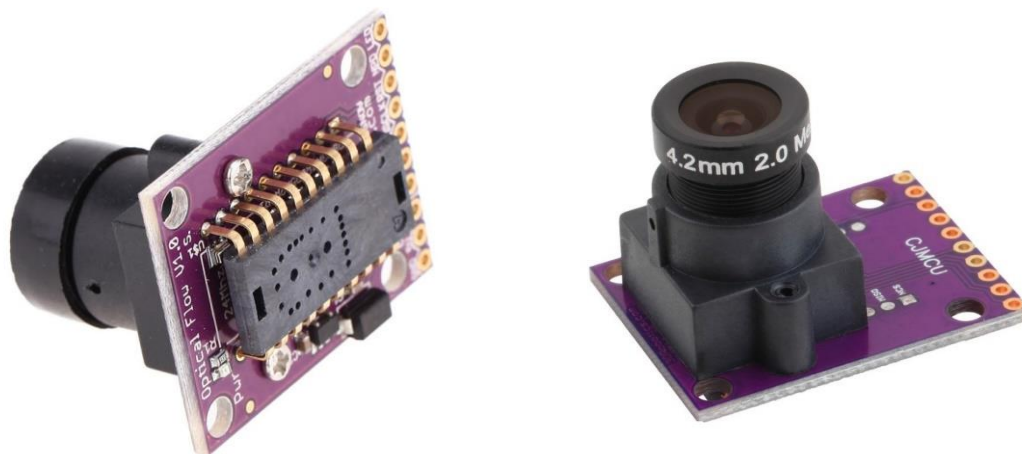
Obr. 2.6: Schéma funkce Block Matching Algorithm (převzato z [12])

Zmíněný algoritmus vyhledává rozpoznatelný bod (pixel) na pořízeném snímku. Ten následně porovnává s rozpoznatelným bodem z předchozího snímku. Z rozdílu poloh bodu v jednotlivých snímcích stanoví vektor posunutí. V závislosti na rozlišení snímku a použitém senzoru algoritmus stanoví několik desítek až tisíců vektorů posunutí. Z nich při dané rychlosti snímání stanoví rychlost pohybu senzoru v rovině.[12]

2.3.1. ADNS 3080

Je velice rozšířený optical flow senzor od firmy Avago Technologies. Čipy této řady se běžně používají ke snímání pohybu počítačových myší. V poslední době nacházejí také využití při snímání pohybu dronů. Senzor vyniká vysokou rychlostí snímání (6400 snímků za sekundu). Snímek má rozlišení 30 x 30 pixelů a senzor z něj dokáže určit až 676 rozpoznatelných bodů. Čip je standardně napájen 3.3 V a komunikuje přes SPI rozhraní. Více informací viz. [13].

Čip, použitý na laboratorním Ballbotovi, je osazen na jednoduché DPS. Na desce je připevněn standardní držák 12mm objektivu a napěťový regulátor LG33 umožňující 5V napájení (stejně jako použité enkodéry).



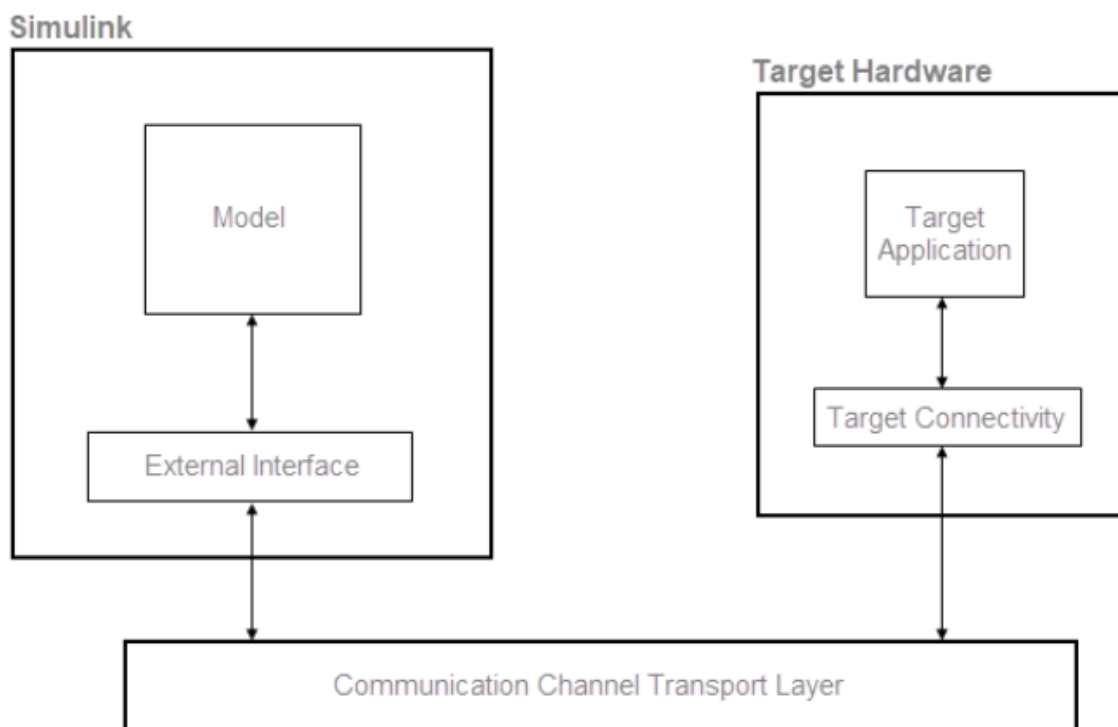
Obr. 2.7: Použitý ADNS 3080 optical flow senzor (převzato z [14])

2.4. Softwarová komunikace a programování

K programování čipu jsou využity softwarové nástroje MATLAB a Simulink od společnosti MathWorks. Hardware rozhraní k naprogramování čipu poskytuje PICkit 4 od společnosti Microchip. Použité softwarové nástroje zajišťují komunikaci mezi PC a mikrokontrolerem v reálném čase. To umožňuje, mimo jiné, okamžité vyčítání dat ze senzorů nebo upravování parametrů řídicího algoritmu za běhu programu. Spojení mikrokontroleru dsPIC33FJ128MC804 a PC je realizováno přes UART/USB rozhraní.

Device Blocks for Simulink – Je stěžejní knihovna od výrobce mikrokontroleru – společnosti Microchip. Knihovna zajišťuje propojení programovacích nástrojů od společnosti Microchip (MPLAB) a od společnosti MathWorks (Simulink). Vývoj aplikací, generování a narávání kódu na mikrokontroler se provádějí skze známé prostředí Simulink. Sada bloků zprostředkovává obsluhu všech periférií čipu (PWM, I2C, SPI, UART,...) a integraci externě napsaných C funkcí. Knihovna také podporuje funkce Processor In the Loop (PIL) a External-Mode (EM).[15]

External Mode (EM) – Tato funkce zprostředkovává komunikační kanál mezi prostředím Simulink na hostitelském PC a mikrokontrolerem, na kterém běží vygenerovaný kód. Transportní vrstva komunikačního kanálu je nezávislá na procesech Simulinku a cílového hardware. EM umožňuje upravovat parametry modelu v reálném čase i vyčítat a ukládat data z cílového hardware v reálném čase. Oboustranná komunikace je však náročná na šířku pásma a při vyšší vzorkovací frekvenci modelu se spojení stává nestabilní.[16]



Obr. 2.8: Blokové schéma funkce External Mode (převzato z [16])

3. Cíle řešení

Na základě rešerše problematiky nestabilních robotů se sférickou základnou a analýzy předchozí verze Ballbota byly identifikovány následující nedostatky a formulovány následující závěry:

- Důležitou vlastností laboratorního Ballbota je jeho schopnost se relativně jednoduše přizpůsobit široké škále průměrů sférické základny. Tento aspekt konstrukce umožňuje budoucí experimentování s různými materiály a úpravami povrchu sférické základny pro dosažení optimálního pohybu robota. V nové verzi Ballbota by tedy měla být zachována schopnost adaptace na různé průměry sférické základny.
- Jedním z cílů této bakalářské práce je osazení optical flow senzoru. Vzhledem k principu funkce senzoru a způsobu pohybu Ballbota je nutné osadit senzor do středu základny. Osazení musí umožňovat vertikální polohování senzoru, aby byla zachována schopnost adaptace na různé průměry sférické základny.
- Je nutné vyřešit způsob uchycení ochranné elektroniky, řídicí elektroniky a akumulátorů s jejich ochrannou elektronikou k nově navržené základně.
- Jednoduchý způsob uchycení motorové klece se osvědčil. Manuální nastavení úhlu jednotlivých motorů je dostatečně přesné. Zajišťovací šrouby umožňují rychlou změnu úhlu a následnou aretaci motorové klece. Zvolená pohonná jednotka svými parametry vyhovuje.
- Provedení uchycení krytu značně snižuje ochrannou schopnost celku a neumožňuje snadnou demontáž krytu. Vyvedené konektory jsou mechanicky poškozené a konektor pro nabíjení akumulátorů není vyveden. Je třeba celkový redesign ochranného krytu.
- U několika použitých akumulátorů CR18650 došlo vlivem dlouhodobého skladování k podvybití a následnému zničení. Je tedy nutná výměna vadných článků za nové a přidání podpěťové ochrany baterie.
- Design řídicí elektroniky zůstává zachován. Na stávající DPS budou vykonány jen drobné úpravy. (pozn. Oproti původnímu plánu bylo do řídicí elektroniky vykonáno více zásahů viz. 4.2.1. Skutečnosti, vyžadující zmíněné zásahy nebyly při celkové analýze zřejmé a k jejich odhalování docházelo až v postupu práce. Žádná skutečnost sama o sobě nutně nevyžadovala celkový redesign DPS, proto byla řídicí elektronika postupně upravována).
- Vzhledem k tomu, že se nepředpokládá výměna pohonné jednotky a design řídicí elektroniky zůstává zachován, jsou jediným identifikovaným nedostatkem

výkonové elektroniky její konektory motorů. Počet a typ vyvedených pinů odpovídá připojení původních enkodérů s hallovými sondami. Vzniklé komplikace však nejsou tak závažné, aby vyžadovaly redesign DPS.

Na základě výše uvedených závěrů byly formulovány tyto cíle řešení:

- Navrhnout a vyrobit novou základnu robota s konstrukčními prvky uchycení všech částí robota a s polohovatelným osazením optical flow senzoru ve středu základny. Zhotovit nový robustní ochranný kryt s možností snadné demontáže. Vyvést servisní a komunikační konektory tak, aby byli chráněny vůči mechanickému poškození
- Upravit řídicí elektroniku tak, aby bylo možné připojit všechny periferie.
- Zrevidovat stav akumulátorů a připojit ochrannou elektroniku.
- Zrevidovat stav enkodérů a zhotovit kabeláž pro SPI komunikaci a napájení motorů.
- Sestavit a zprovoznit robota.
- Otestovat funkcionalitu nově přidaného senzoru. Vytvořit soubory pro komunikaci a ovládání jednotlivých periférií v prostředí Simulink, které budou sloužit k integraci do nového řídicího algoritmu.

4. Postup řešení a výsledky

První část této kapitoly popisuje postup při redesignu a výrobě jednotlivých konstrukčních komponentů robota. Dále jsou popsány provedené úpravy elektroniky a kabeláže. Závěrečná podkapitola se věnuje zhodnocení výsledků testování nově přidaného senzoru.

4.1. Návrh a výroba konstrukce robota

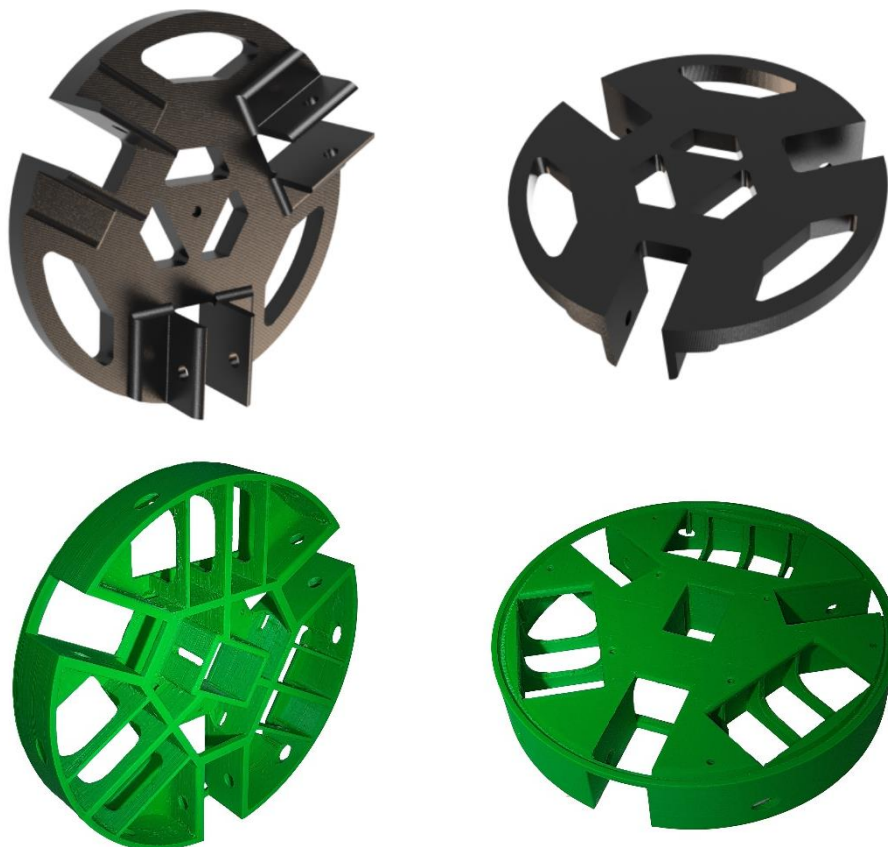
Základní koncepce robota zůstala shodná s předchozí verzí. Na centrální díl (základna) jsou připevněny všechny ostatní součásti robota. Tři původní pohonné jednotky s koly omniwheel jsou rozmístěny po obvodu základny v úhlu 120° . Geometrie a dynamika celé soustavy prodělaly minimální změny. Hmotnost celé nové konstrukce včetně pohonných jednotek a akumulátorů činí 1,52 kg, což je o pouhých devadesát gramů více než u předchozí verze. U níže rozepsaných součástí došlo k odstranění identifikovaných nedostatků konstrukce a ke zvýšení jejich robustnosti.

Pro návrh jednotlivých komponentů byl využit software Inventor od společnosti Autodesk. Jako metoda výroby navrhnutých součástí byl zvolen FDM 3D tisk plastů. Tato metoda umožňuje v porovnání s ostatními metodami (obrábění, frézování, vstřikování plastů, apod.) jednoduchou, rychlou, levnou a dostupnou výrobu komplikovaných návrhů s dostatečnou přesností a pevností. Tyto atributy spolu s nízkými náklady umožnily iterativní výrobu prototypů součástek a jejich testování pro dosažení optimálních vlastností. Jako materiál byl zvolen PLA. Tento plast vyniká především jednoduchostí tisku, stálostí rozměrů a dostupností.

Pozn. Navržené modely jednotlivých komponentů jsou dostupné v elektronických přílohách.

4.1.1. Základna

Návrh základny se řídil myšlenkou, že pro dosažení uspokojivé robustnosti a tuhosti konstrukce jako celku musí být ochranný kryt spojen přímo se základnou bez použití rozšiřujícího prstence viz. 2.2.1. Následně samotná základna musí být vytisknuta v jednom kuse. Průměr základny byl omezen maximální možnou plochou výtisku běžně dostupných 3D tiskáren na 21 cm. Těchto rozměrů dosahovala i původní základna bez rozšiřujícího prstence. Při návrhu byl tedy také kladen důraz na efektivnější využití prostoru.

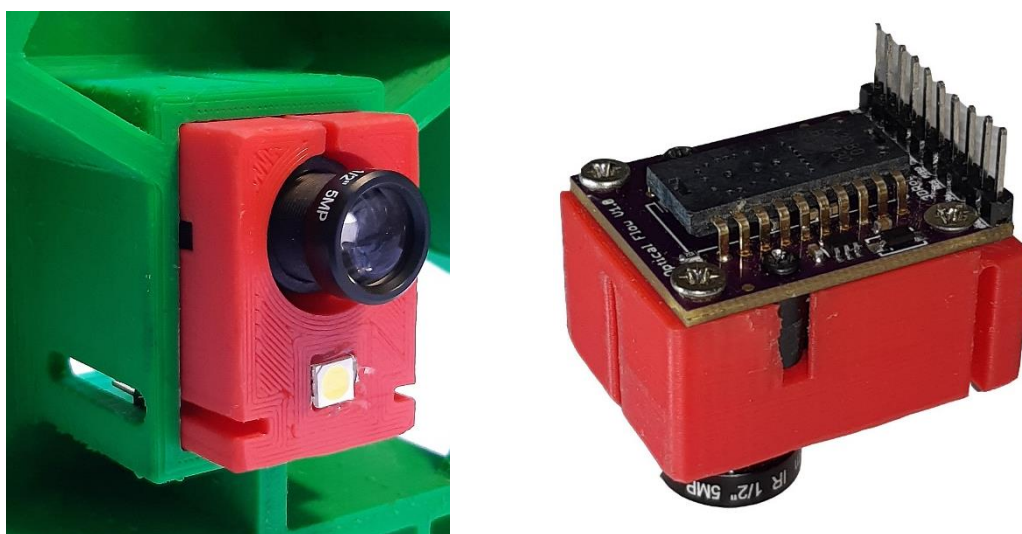


Obr. 4.1: Porovnání původní verze základny (černá, převzato z [8]) a finální verze základny (zelená)

Z původní verze základny byl převzat způsob uchycení motorových jednotek. Toto řešení zanechává značný prostor mezi hlavní plochou základny a sférickou základnou robota, a to nezávisle na zvoleném průměru sférické základny. Centrální část základny pod její hlavní rovinou byla využita pro osazení optical flow senzoru (více v 4.1.2.). Zbylý prostor po obvodu základny mezi motorovými jednotkami byl využit pro uložení akumulátorů. Rozložení váhy baterií bylo tímto krokem zachováno, protože jednotlivé články byly pouze zapuštěny do základny pod její hlavní rovinu. V hlavní rovině základny díky těmto úpravám vznikl dostatek místa jak pro upevnění stávající elektroniky, tak pro případná budoucí rozšíření.

4.1.2. Osazení optical flow senzoru

DPS senzoru je připevněna k navržené součásti ve tvaru kvádru. Ta má v sobě kruhový otvor skrývající optickou soustavu senzoru. Rozměry otvoru umožňují snadnou kalibraci či výměnu optiky. Součást má také otvor pro osazení nasvětlující led diody (více v 4.3.1.). Celek je vložen do šachty obdélníkového průřezu v centrální části základny. Toto uložení umožňuje spojitou svislou kalibraci senzoru v rozmezí 0 – 26 mm od hlavní roviny základny (pozn. Výsledná vzdálenost senzoru od snímaného povrchu závisí také na dalších parametrech, jako jsou průměr sférické základny a úhel natočení motorů). Nastavená poloha senzoru je aretována pojistnými šrouby v bocích šachty.



Obr. 4.2: Osazení optical flow senzoru s připevněným senzorem

4.1.3. Interface panel a ochranný kryt

Nosnou část krytu tvoří nerezová miska kopulovitého tvaru. Její průměr byl zvolen co největší (OD 192 mm) s ohledem na maximální možný průměr základny a na nabídku vyráběných misek. Hrana krytu zapadá po celém obvodu do drážky při okraji základny. Pevného spoje ochranného krytu a základny bylo dosaženo připevněním čtyř plastových bloků po vnitřním obvodu krytu. Do nich byly následně skrz základnu našroubovány vruty, přístupné ze spodní strany základny.

Ve vrchní části krytu byl vyříznut kruhový otvor, do kterého byl vsazen navržený interface panel. Po obvodu panelu byl zhotoven závit, na který byla následně našroubována plastová matka. Panel byl osazen hlavním spínačem, nabíjecím konektorem, piny pro programování mikrokontroleru pomocí PICKit 4 a FTDI čipem s mini-USB rozhraním. Zmíněný čip zprostředkovává převod mezi UART rozhraním mikrokontroleru a USB rozhraním počítače. Panel je modulární a umožňuje snadnou

výměnu v případě příštích rozšíření. Jednotlivé konektory jsou zapuštěny pod úroveň krytu, aby nedocházelo k jejich mechanickému poškození.



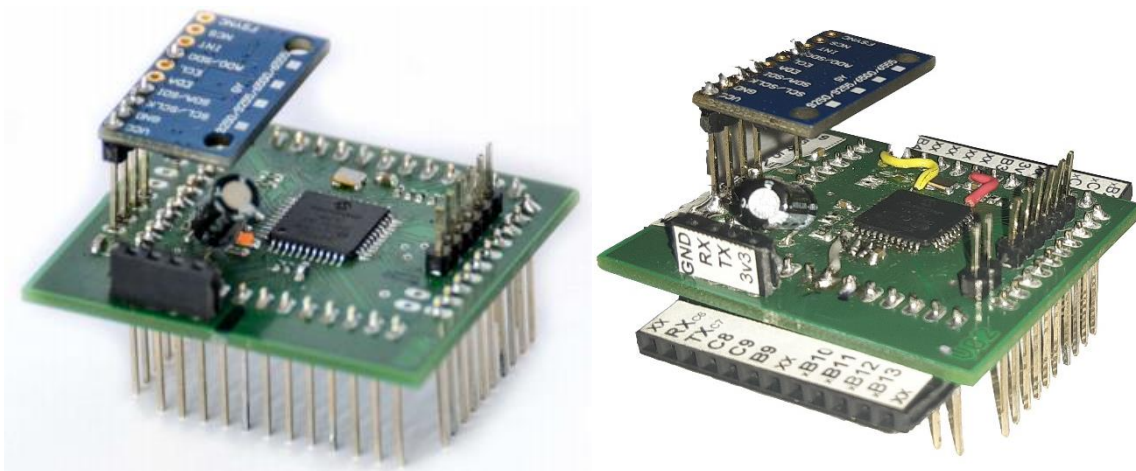
Obr. 4.3: Porovnání předchozí verze ochranného krytu (vlevo) a finální verze ochranného krytu (vpravo)

4.2. Elektronika

Úprava elektroniky nebyla jedním z cílů v zadání práce, ale v průběhu realizace se ukázala jako nezbytná pro úspěšné zprovoznění robota. DPS výkonové elektroniky zůstala původní a nebyly na ní provedeny žádné úpravy. Původní konektory pro napájení motorových jednotek a komunikaci s inkrementálními enkodéry byly ponechány, ale nadále byla využita jen jejich část pro napájení motorových jednotek. DPS řídicí elektroniky zůstala také původní, ale byly na ní vykonány níže rozepsané úpravy.

4.2.1. Řídicí elektronika

Původní návrh DPS neumožňoval připojení vodičů k nevyužitým pinům mikrokontroleru. Aby byl zaručen přístup k libovolnému pinu i pro případné budoucí zásahy do řídicí elektroniky a rozšíření, byly na pinové lišty spojující řídicí a výkonovou elektroniku napájeny konektory. Piny čipu, které nebyly vyvedeny na pinové lišty, byly přemostěny pomocí drátu. Na pinech čipu, které se používaly pro příjem signálu z původních enkodérů, byly přítomny RC filtry. Ty bylo nutno odpájet, protože při přenosu dat z aktuálních enkodérů docházelo k tlumení signálu.

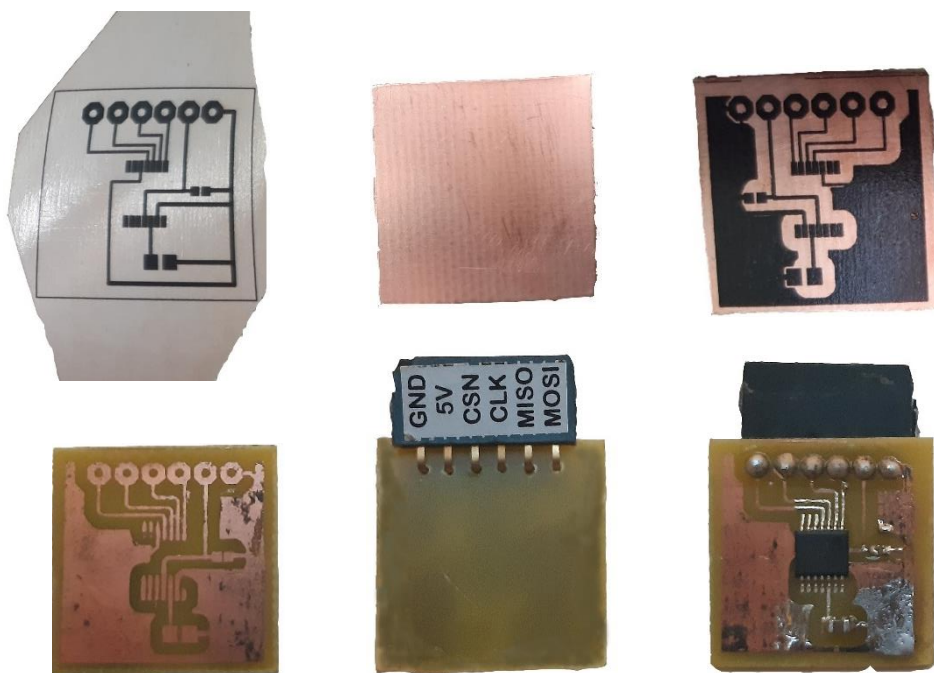


Obr. 4.4: Porovnání předchozí verze řídicí elektroniky (vlevo, převzato z [10]) a finální verze řídicí elektroniky (vpravo)

Úvodní pokusy o navázání spojení s mikrokontrolerem byly neúspěšné. Po vyloučení typických příčin na straně PC (pozn. Spojení s identickým čipem na beta verzi řídicí elektroniky bylo úspěšné) byl nejpravděpodobnějším důvodem problémů vadný čip na řídicí desce. Po jeho výměně však problémy v komunikaci přetrvávaly. Při podrobné kontrole DPS byla odhalena drobná chyba v jejím návrhu. Kondenzátor na MCLR pinu nebylo možné odpojit, to znemožňovalo úspěšné naprogramování čipu (podrobněji viz. [17]). Provedené změny byly zaznamenány do schématu elektroniky a jsou k dispozici v elektronických přílohách.

4.2.2. Enkodéry

K dispozici byly sady DPS s dvěma typy rotačních magnetických enkodérů, MLX90363 a AS5048A (viz. 2.2.). Při testování prvního ze jmenovaných nebylo dosaženo uspokojivých výsledků. Především byla nedostatečná rychlost vyčítání úhlu natočení vzhledem k použitým motorovým jednotkám a k možnostem mikrokontroleru. Pro finální osazení byl tedy vybrán AS5048A. Jedná se o magnetický enkodér s čtrnáctibitovým rozlišením, který komunikuje pomocí SPI rozhraní (více viz. [9]).



Obr. 4.5: Fáze výroby DPS enkodéru nažehlovací metodou

Jeden z čipů AS5048A byl však zničený a deska nenávratně poškozená. Bylo tedy rozhodnuto o návrhu a výrobě nové DPS. Jako předloha byl použit dostupný návrh pro AS5147, který byl upraven pro AS5048A. Při úpravách bylo postupováno podle zásad z [18]. Možnosti výroby byly v době realizace omezené. Z dostupných možností byla zvolena nažehlovací metoda. Jedná se o nenáročnou metodu výroby jednoduchých plošných spojů, realizovatelnou v domácím prostředí. Žádaný plošný spoj je vytisknut laserovou tiskárnou na obyčejný lepicí papír a následně přezhelen na DPS. Deska je poté vložena na několik minut do chemické lázně, kde dojde k odleptání nežádoucí mědi.

4.2.3. Akumulátory

Použitý typ akumulátorů Li-Ion 18650 byl zachován. Stávající ochrana na jednotlivých článcích se ukázala jako nedostatečná. Byla proto nahrazena jedním společným ochranným modulem, který byl připevněn na jeden z článků. Z nabídky byl vybrán běžně dostupný ochranný modul proti vybití, přebití, zkratu a přetížení. Základ modulu tvoří sada DW01FA čipů, doplněná o 3050K mosfety a MMBT5401 tranzistory. Kabeláž spojující jednotlivé články byla vedena ze spodní strany základny.

4.3. Testování senzorů

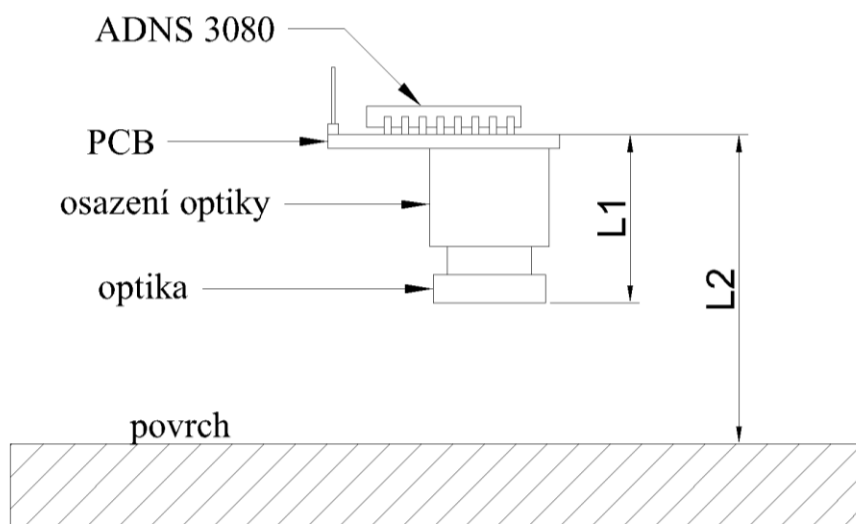
Testování se soustředilo na nově přidaný optical flow senzor. Cílem bylo experimentálně zjistit optimální nastavení senzoru v závislosti na okolních podmínkách. Získaná data mohou tvořit podklad při návrhu a výrobě nové sférické základny.

4.3.1. Optical flow senzor ADNS 3080

Na základě počátečních testů a rešerše senzoru byly identifikovány tři hlavní kategorie, ovlivňující kvalitu naměřených dat (povrchy, nastavení optiky, osvětlení, podrobněji popsány níže). V každé kategorii byla nejdříve nalezena nejlepší známá konfigurace. Ta byla následně použita při měření ostatních kategorií.

K porovnání kvality naměřených dat byla využita funkce senzoru nazývaná SQUAL. Hodnota registru SQUAL vyjadřuje počet rozpoznatelných bodů v aktuálním snímku. Maximální hodnota je 169. Obecně platí, že čím vyšší je hodnota registru, tím kvalitnější jsou naměřená data. Při určování polohy pomocí optical flow senzoru je tedy žádoucí tuto hodnotu co nejvíce maximalizovat. Experimentálně bylo zjištěno, že naměřená data s hodnotou SQUAL menší než 50 vykazují vysokou míru zkreslení a s hodnotou SQUAL menší než 35 zcela neodpovídají skutečnosti.

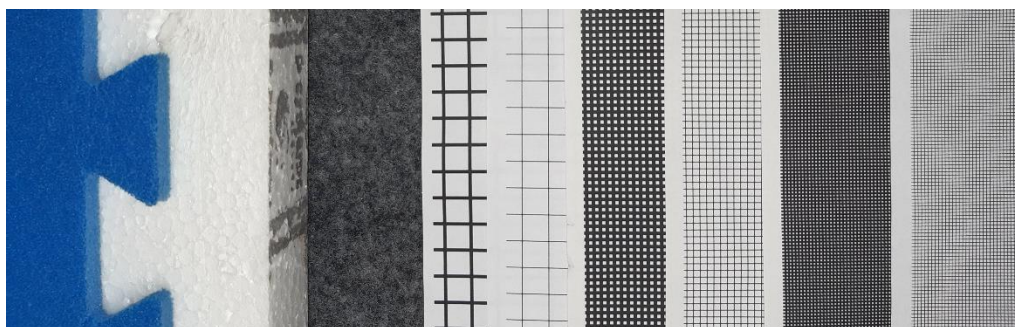
Všechny grafy, uvedené v této podkapitole, vyjadřují závislost kvality naměřených dat na vzdálenosti optical flow senzoru od snímaného povrchu. Rozsah zkoumané vzdálenosti byl zvolen s ohledem na konstrukční možnosti osazení senzoru a možnou velikost mezery mezi základnou robota a sférickou základnou. K objasnění principu měření vzdálenosti slouží následující schéma:



Obr. 4.6: Schéma měření vzdálenosti optical flow senzoru od zkoumaného povrchu

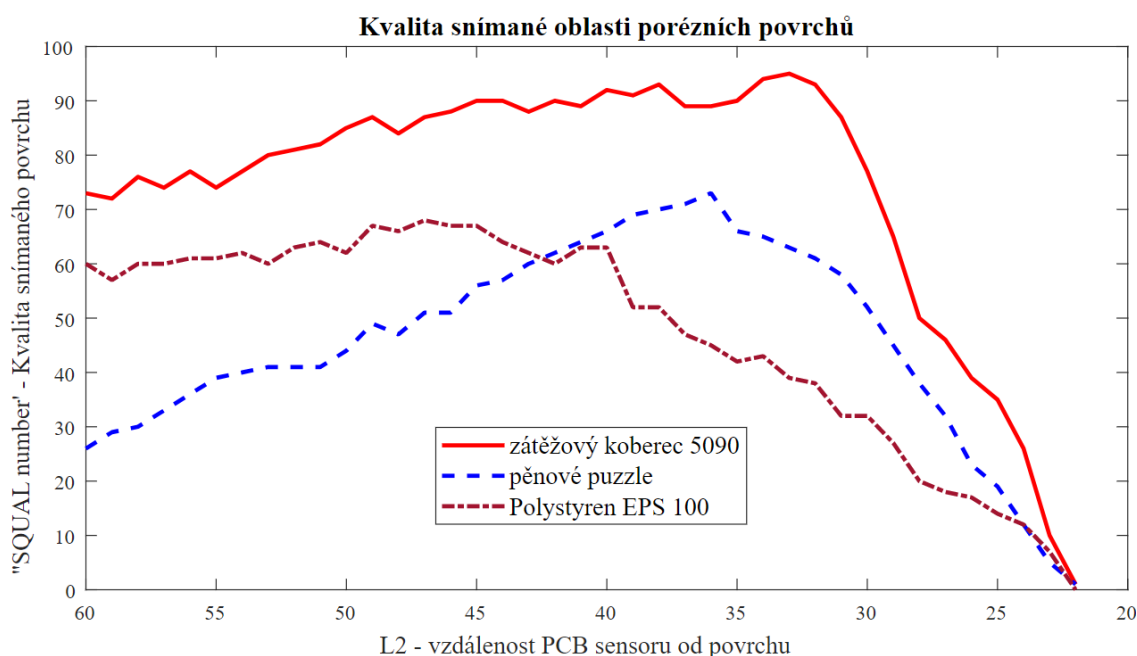
Povrchy:

První z uvedených kategorií se zabývá závislostí kvality naměřených dat na vlastnostech a typu snímaného povrchu. Měření bylo provedeno na mnoha různých površích. V následujících grafech jsou uvedeny pouze vyhovující povrchy, které vykazovaly dostatečně vysoké hodnoty SQUAL (hodnota SQUAL pro alespoň jednu zkoumanou vzdálenost překročila hodnotu 50). Mezi nevyhovující povrchy patří například guma gymnastického míče, leštěné dřevo, leštěná ocel, bílý papír, sklo, plovoucí podlaha. Vyhovující povrchy jdou rozdělit podle charakteristických rysů do dvou skupin:



Obr. 4.7: Přehled zkoumaných povrchů (od levého okraje v pořadí: pěnové puzzle, polystyren EPS 100, zátěžový koberec 5090, síť 8mm/1mm, síť 8mm/0.2mm, síť 2mm/1mm, síť 2mm/0.2mm, síť 1mm/0.5mm, síť 1mm/0.13mm)

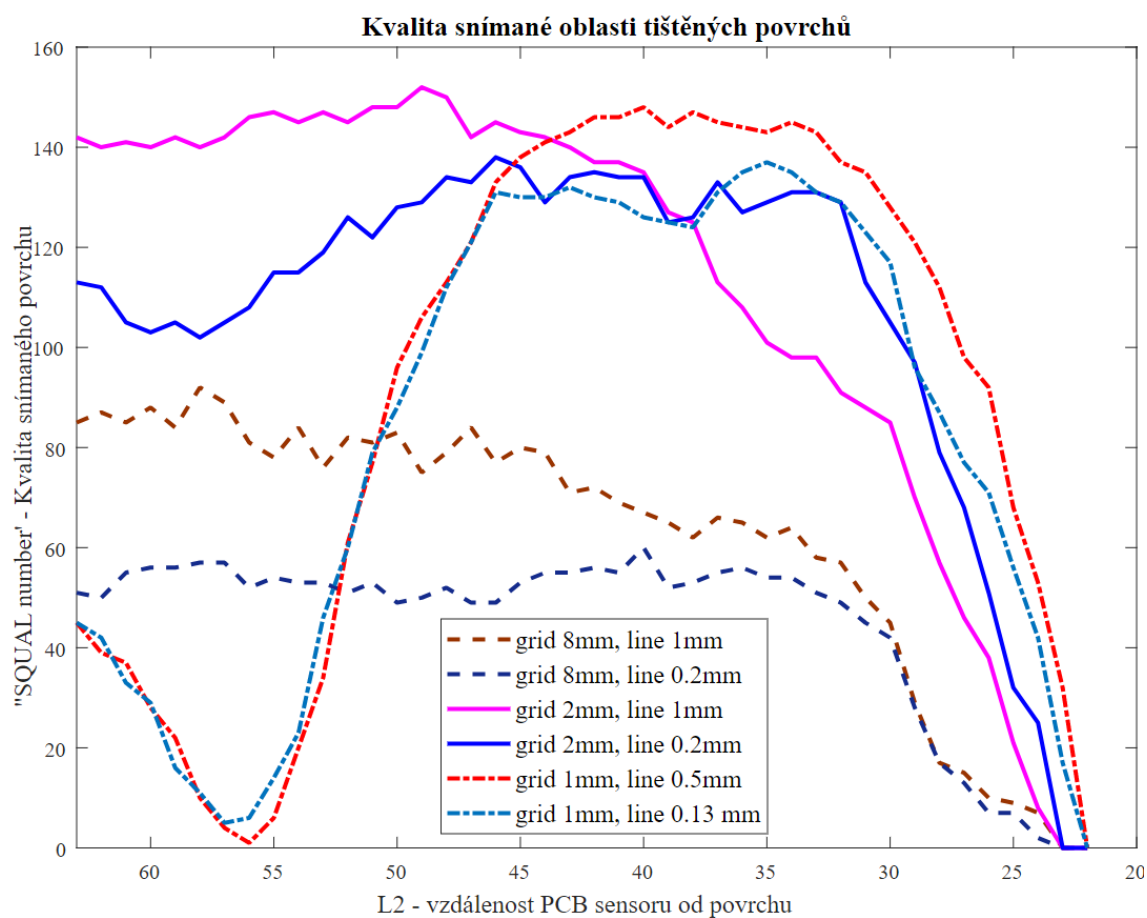
Porézní povrchy – Společným rysem této skupiny je členitost povrchu. Zlomy a kazy ve struktuře povrchu náhodně lámou dopadající světlo a vytvářejí rozpoznatelné body na snímku povrchu.



Obr. 4.8: Graf kvality snímané oblasti porézních povrchů (optika 4.2 mm, L1 = 22.5 mm, vysoké osvětlení)

Naměřené hodnoty poréznych povrchů korelují se subjektivním vnímáním porézности povrchu. Pěnové puzzle je subjektivně poréznější, ale méně výškově členité než polystyren. Zátěžový koberec je nejvíce porézni a výškově členitý. Vykazuje také nejvyšší hodnoty SQUAL ze skupiny poréznych povrchů. Byl proto použit při testování ostatních kategorií.

Tištěné povrchy – Na homogenním povrchu je vytvořen pro senzor snadno rozpoznatelný obrazec. Pro účely testu byla na bílý papír natištěna černá čtvercová síť (grid) s různými tloušťkami čáry a různou velikostí čtverce. Rozdílné optické vlastnosti barev vytvářejí rozpoznatelné body na snímku povrchu.

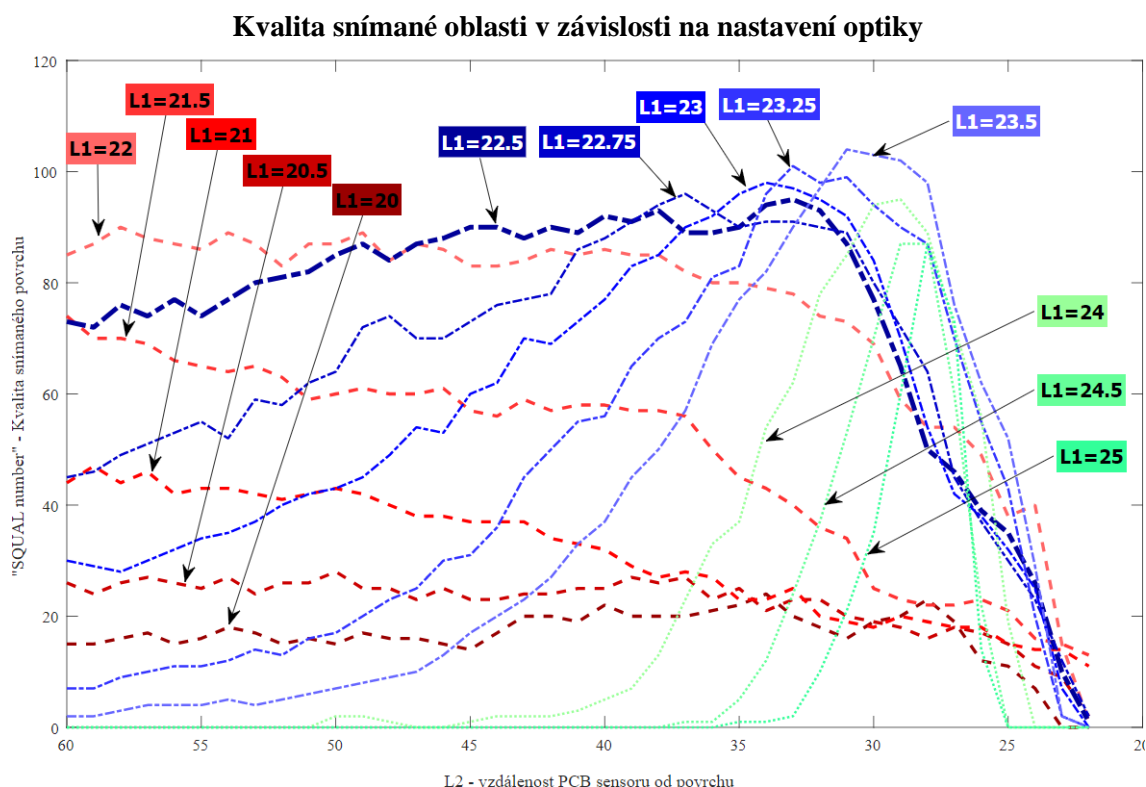


Obr. 4.9: Graf kvality snímané oblasti tištěných povrchů (optika 4.2mm, L1 = 22.5 mm, vysoké osvětlení)

Nejzajímavějším odhalením ve skupině tištěných povrchů je znatelný přechodný pokles hodnot v první části grafu u sítí s délkou strany čtverce 1 mm. Při bližší analýze jevu se ukázalo, že k poklesu dochází z důvodu rozostření obrazu. Ten se přechodně shoduje s pravidelnými rysy obrazce a dochází k vyrušení všech rozpoznatelných bodů. Nejkonzistentnějších výsledků dosahuje síť 2mm/0.2mm. Byla proto zvolena jako druhý povrch pro testování zbylých kategorií.

Nastavení optiky

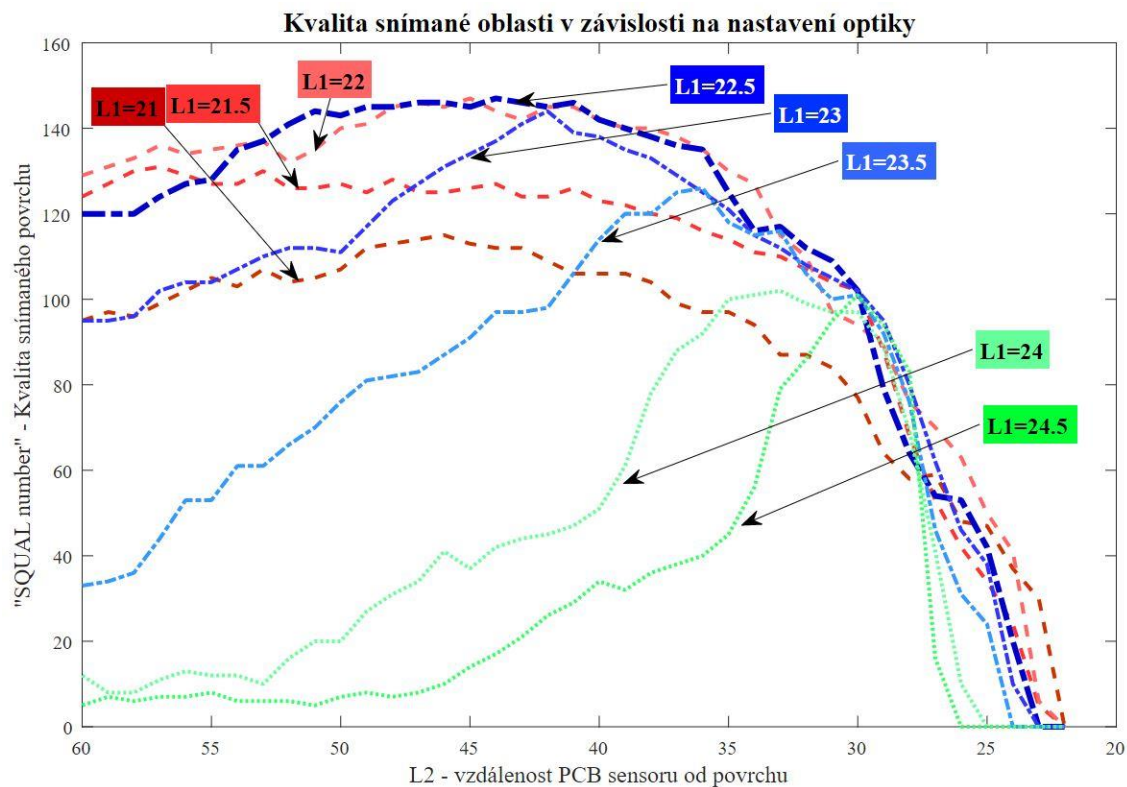
Standardní držák optiky umožňuje spojitě nastavení vzdálenosti optiky od senzoru přibližně v intervalu 1-13 mm. Bylo tedy provedeno měření kvality povrchu pro různé vzdálenosti optiky od senzoru. K dispozici byly optiky s ohniskovou vzdáleností 4.2 mm a 25 mm. Při testování se ukázalo, že druhá ze jmenovaných optik svými parametry nevyhovuje požadavkům úlohy laboratorního Ballbota. Měření byla tedy prováděna pouze s čočkou 4.2 mm.



Obr. 4.10: Graf kvality snímaného povrchu v závislosti na nastavení optiky (optika 4.2 mm, zátěžový koberec 5090, vysoké osvětlení)

Z grafu je patrné, že zvolené vzdálenosti optiky se dají rozdělit do tří skupin. Pro skupinu $L1 \leq 22$ mm (v grafu zobrazena odstíny oranžové a čárkovanou čarou) je typický pozvolný pokles hodnoty SQUAL přes celou šíři zkoumané oblasti. Skupina $L1 < 22.5; 23.5$ (v grafu znázorněna odstíny modré a čerchovanou čarou) se vyznačuje růstem v první části grafu, maxima nabývá okolo hodnoty $L2 = 33$ mm a následně rychle padá k nulovým hodnotám. Skupina $L1 \geq 24$ mm (v grafu znázorněna odstíny zelené a tečkovanou čarou) je v první části prakticky nulová, v okolí maxima $L2 = 29$ mm nejdříve razantně stoupá a následně stejným tempem klesá.

Z grafu je také patrný plynulý přechod mezi jednotlivými skupinami. Na základě naměřených hodnot můžeme říci, že nejlepších výsledků po co nejširší oblasti dosáhneme s nastavením čočky do vzdálenosti $L1 \approx 22.5$ mm.

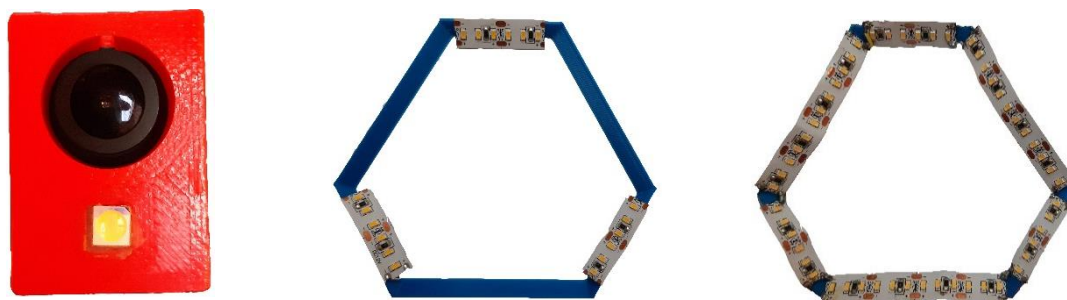


Obr. 4.11: Graf kvality snímaného povrchu v závislosti na nastavení optiky (optika 4.2 mm, síť 2mm/0.2mm, vysoké osvětlení)

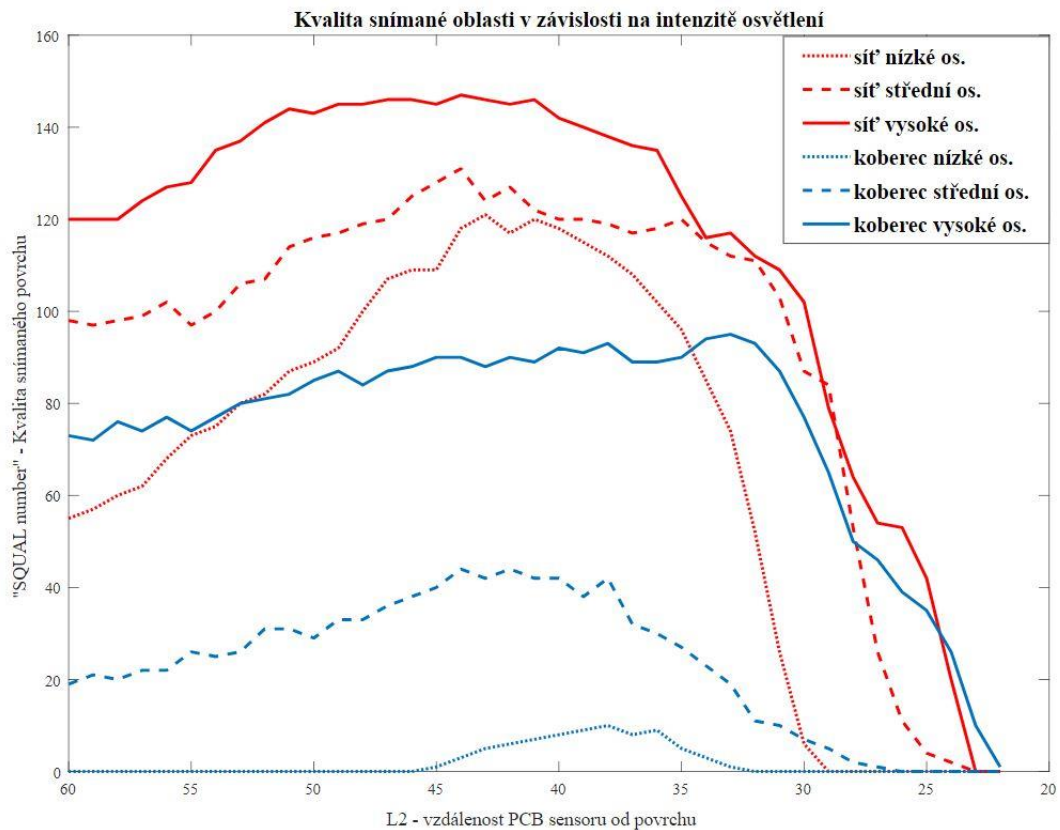
Naměřené hodnoty pro síť 2mm/0.2mm svým trendem odpovídají hodnotám pro zátěžový koberec 5090. Na tištěném povrchu je dosaženo řádově vyšších hodnot SQUAL, což také odpovídá předchozím měřením.

Osvětlení

Poslední kategorie se zabývá vlivem osvětlení na kvalitu naměřených dat. Za účelem objasnění této problematiky byly zkonstruovány tři varianty osvětlení. Nazýváme je nízké, střední a vysoké osvětlení (viz. následující obrázek). S každou variantou bylo provedeno měření na zátěžovém koberci 5090 a čtvercové síti 2mm/0.2mm. Výsledky byly zaznamenány do grafu 4.13.



Obr. 4.12: Přehled variant osvětlení (zleva v pořadí: nízké, střední, vysoké)

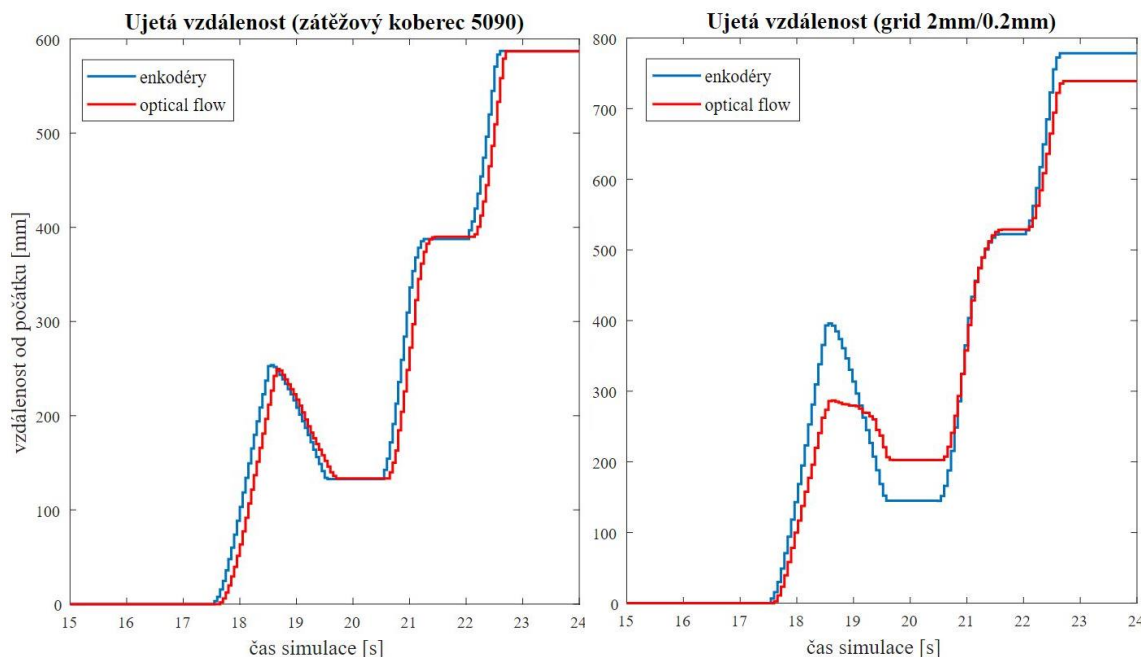


Obr. 4.13: Graf kvality snímaného povrchu v závislosti na intenzitě osvětlení (optika 4.2 mm, L1 = 22.5 mm)

Z grafu je patrné, že intenzita osvětlení má velký vliv na kvalitu snímaného povrchu. Nízké osvětlení se od ostatních liší provedením. Led-dioda je umístěna na kvádrové součásti sensoru. Při jeho polohování tedy dochází k oddálení diody od povrchu a dalšímu snížení nasvětlení povrchu. Střední a vysoké osvětlení jsou ukotveny ze spodní strany základny v úhlu 45°. Tím dochází ke konstantnímu ozáření povrchu. Rozdíl mezi středním a vysokým osvětlením je v počtu použitých led-diod (střední 18 diod \approx 60 lm, vysoké 54 diod \approx 178 lm).

4.3.2. Porovnání dat z optical flow senzoru s daty z enkodérů

Cílem následujícího testu bylo ověřit spolupráci enkodérů a optical flow senzoru při určování polohy Ballbota. Robot byl položen na rovnou testovací plochu (zátěžový koberec a síť 2mm/0.2mm), na které následně ujel vymezenou vzdálenost. Profil trasy se skládal z několika úseků s různou rychlostí pohybu. V průběhu testu byla kontinuálně vyčítána data z optical flow senzoru a enkodérů. Nakonec byla manuálně změřena reálné ujetá vzdálenost. Výsledky měření byly zaneseny do následujících grafů:



Obr. 4.14: Graf ujeté vzdálenosti v závislosti na použitém senzoru a snímaném povrchu (optika 4.2 mm, $L_1 = 22.5$ mm, $L_2 = 39$ mm, maximální osvětlení)

Měřená poloha pomocí enkodérů, byla stabilní na obou zkoumaných površích. Její výsledná hodnota se od manuálně změřené prakticky nelišila (rozdíl hodnot byl nižší než nejistota manuálního měření). Můžeme tedy předpokládat, že při pohybu nedošlo k prokluzu kol.

Poloha dle optical flow senzoru na zátěžovém koberci se shoduje s polohou dle enkodérů. Z grafu je patrné zpoždění optical flow senzoru. Jeho hodnota je přibližně 0.1 sekundy a vzniká patrně při zpracování obrazu senzorem. Poloha dle optical flow senzoru na čtvercové síti je značně nepřesná. Podrobnější měření ukázalo, že kvůli pravidelnému charakteru povrchu, nedokáže senzor správně vyhodnotit velikost a směr posuvu robota. Míra nepřesnosti není konstantní. Při opakovaném měření na stejné části povrchu byly naměřeny různé průběhy polohy.

4.3.3. Integrace senzorů v prostředí Simulink

Pro jednotlivé senzory byly v prostředí Simulink vytvořeny jednoduché modely. Každý z nich obsahuje nastavení připojení daného senzoru a extrakci žádané informace z bitové komunikace (úhel natočení, míru posuvu apod.). Model s názvem Final Test Code umožňuje ovládat napětí na motorech a vyčítat míru posuvu podle enkodérů a podle optical flow senzoru. S jeho pomocí lze reprodukovat měření z 4.3.2. Modely slouží k seznámení s principem komunikace mikrokontroleru a PC v prostředí Simulink. Modely mohou být využity při návrhu nového řízení Ballbota a zprostředkovat integraci senzorů do navrženého algoritmu. Modely jsou k dispozici v elektronických přílohách.

5. Závěr

V rámci této bakalářské práce byla provedena analýza předchozí verze Ballbota a na jejím základě stanoveny dílčí cíle redesignu. Základní koncepce Ballbota byla zachována. Konstrukční prvky byly navrženy a upraveny tak, aby umožňovaly integraci nově přidaného optical flow senzoru a poskytovaly vyšší míru ochrany elektroniky robota. Většina součástí byla vyrobena pomocí 3D tisku, zbylé součásti byly upraveny z běžně dostupných předmětů.

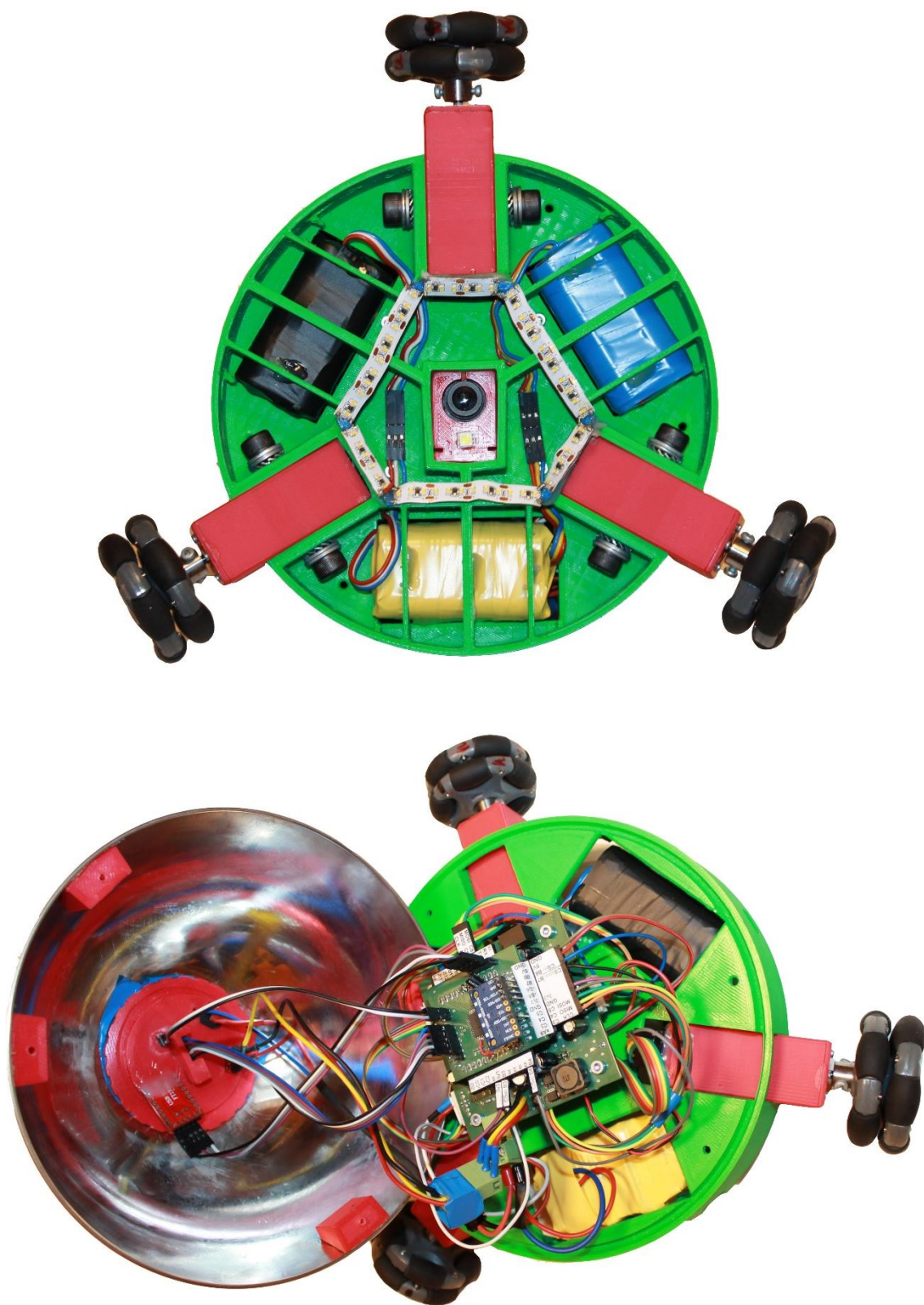
Řídící a výkonová elektronika byly upraveny tak, aby umožňovaly snadné připojení všech stávajících senzorů a možných budoucích rozšíření. Enkodéry motorů byly zrevidovány a nefunkční komponenty byly nahrazeny nově vyrobenými. K akumulátorům byla přidána ochrana proti vybití, přebití, zkratu a přetížení.

Nově přidaný optical flow senzor byl podroben sérii testů, jejichž úkolem bylo zmapovat vliv okolních podmínek a nastavení na funkci senzoru. Experimentálně byly nalezeny optimální vzdálenosti senzoru od snímané plochy a senzoru od použité optiky. Byla také stanovena závislost mezi mírou osvětlení snímaného povrchu a kvalitou naměřených dat. Na základě měření různých povrchů byly stanoveny požadované vlastnosti povrchu budoucí sférické základny. Mezi ně patří především vysoká poréznost nebo vysoký kontrast snímané oblasti. Ideálních vlastností by zřejmě dosahoval povrch s natištěnými nepravidelnými obrazy.

Všechny konstrukční, elektronické a senzorické prvky Ballbota jsou sestaveny ve funkční celek a jsou připraveny pro vývoj nového řídicího algoritmu.



Obr. 4.15: Ballbot na sférické základně (gymnastický míč)



Obr. 4.16: Sestavení Ballbota

6. Seznam použitých zdrojů

- [1] SEYFARTH, Greg. *Design, Construction, and Evaluation of a Ballbot with a Spherical Induction Motor* [online] Pittsburgh, 2016 [cit. 05.06.2020]. Doktorská práce. Carnegie Mellon School of Computer Science, Robotics Institute. Vedoucí diplomové práce prof. Ralph Hollis. Dostupné z: https://www.ri.cmu.edu/pub_files/2016/8/final_final_thesis.pdf
- [2] LAUWERS, T. B.; KANTOR, George A.; HOLLIS, Ralph L. *A dynamically stable single-wheeled mobile robot with inverse mouse-ball drive*. In: Robotics and Automation, 2006. ICRA 2006. Proceedings 2006 IEEE International Conference on. IEEE, 2006. p. 2884-2889.
- [3] JESPERSEN, Thomas K. *Kugle - Modelling and Control of a Ball-balancing Robot* [online] Aalborg, 2019 [cit. 05.06.2020]. Doktorská práce. Aalborg university. Vedoucí diplomové práce Thomas Bak. Dostupné z: <https://www.scribd.com/document/412404790/Kugle-Modelling-and-Control-of-a-Ball-balancing-Robot>
- [4] FANKHAUSER, Péter a Corsin GWERDER. *Modeling and control of a ballbot* [online]. Zurich, 2010 [cit. 05.06.2020]. Bakalářská práce. Swiss Federal Institute of Technology Zurich. Vedoucí práce Stefan Leutenegger, Francis Colas. Dostupné z: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.886.3363&rep=rep1&type=pdf>
- [5] 58mm Omni wheel for Lego NXT/EV3. *Generation Robots* [online]. France, 2020 [cit. 05.06.2020]. Dostupné z: https://static.generation-robots.com/14197-thickbox_default/58mm-omni-wheel-for-lego-nxt.jpg
- [6] CMU_BallbotEricAndAnish *Dynamically-Stable Mobile Robots in Human Enviroments* [online]. Microdynamic Systems Laboratory, 2013 [cit. 05.06.2020]. Dostupné z: http://www.msl.ri.cmu.edu/projects/ballbot/images/CMU_BallbotEricAndAnish.jpg
- [7] Kugle_Ballbot. *Wikimedia Commons* [online]. Creative Commons, 2020 [cit. 05.06.2020]. Dostupné z: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/94/Kugle_ballbot.jpg
- [8] ŠPILA, Filip. *Návrh konstrukce a řízení nestabilního robota se sférickou základnou*. Brno, 2017. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí bakalářské práce Ing. Tomáš Spáčil.
- [9] KIRCHNER, Tomáš. *Výroba a implementace enkodérové jednotky*. Brno, 2018. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí bakalářské práce Ing. Tomáš Spáčil.
- [10] RAJCHL, Matej. *Návrh elektroniky a senzoriky nestabilního robota se sférickou základnou*. Brno, 2018. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí bakalářské práce Ing. Tomáš Spáčil.

- [11] SOOYONG, Lee a Song JAE-BOK. *Mobile Robot Localization Using Optical Flow Sensors* [online]. In: International Journal of Control, Automation, and Systems, 2004 [cit. 07.06.2020]. vol. 2, no. 4, p. 485-493. Dostupné z: <https://pdfs.semanticscholar.org/f2e3/e16e6e9871284947272cfd0fbd0508358e60.pdf>
- [12] SHEN, Chong, zesen BAI, huiliang CAO, et al. *Optical Flow Sensor/INS/Magnetometer Integrated Navigation System for MAV in GPS-Denied Environment*. Journal of Sensors [online]. Hindawi Publishing Corporation, 2016, p. 10 [cit. 07.06.2020]. Dostupné z: <https://www.hindawi.com/journals/js/2016/6105803/>
- [13] Avago Technologies [online katalogový list]. *ADNS-3080 High-Performance Optical Mouse Sensor*, 2005-2008 [cit. 07.06.2020]. Dostupné z: <https://www.openimpulse.com/blog/wp-content/uploads/wpsc/downloadables/ADNS-3080.pdf>
- [14] Optical Flow Sensor APM2.5 Multicopter ADNS 3080 Optický Senzor pro Arduino. *Arduino-Shop* [online]. ECLIPSEA s.r.o., 2020 [cit. 07.06.2020]. Dostupné z: <https://arduino-shop.cz/arduino/1383-optical-flow-sensor-apm2.5-multicopter-adns-3080-opticky-senzor-pro-arduino.html>
- [15] MPLAB Device Blocks for Simulink Introduction. *Microchip Developer Help* [online]. Microchip Technology Inc. 2020 [cit. 07.06.2020]. Dostupné z: <https://microchipdeveloper.com/simulink:introduction#top-of-page>
- [16] Host-Target Communication with External Mode Simulation. *MathWorks* [online]. MathWorks Inc. 1994-2020 [cit. 07.06.2020]. Dostupné z: https://www.mathworks.com/help/supportpkg/armcortexa/ug/set-up-and-use-hosttarget-communication-channel.html#mw_210d1e9a-eaf1-46aa-88d6-ca057cfd7908
- [17] Microchip Technology Inc. [online katalogový list]. *dsPIC33FJ32MC302/304, dsPIC33FJ64MCX02/X04 and dsPIC33FJ128MCX02/X04*, 2007-2012 [cit. 20.5.2020]. Dostupné z: <https://eu.mouser.com/datasheet/2/268/70291G-254604.pdf>
- [18] ZÁHLAVA, Vít. *Návrh a konstrukce desek plošných spojů*. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2005. ISBN 80-01-03351-1.

7. Seznam použitých zkratek a symbolů

| | |
|-------|--|
| IMB | Inverse Mouse-ball Drive |
| CMU | Carnegie Mellon University |
| SIM | Spherical Induction Motor |
| DPS | deska plošných spojů |
| PLA | polylactic acid – kyselina polymléčná |
| IMU | Inertial Measurement Unit |
| I2C | Inter-Integrated Circuit |
| BMA | Block Matching Algorithm |
| SPI | Serial Peripheral Interface – seriové periferní rozhraní |
| UART | Universal Asynchronous receiver-transmitter |
| PWM | Pulse Width Modulation – pulzně šířková modulace |
| PIL | Processor In the Loop |
| EM | External Mode |
| FDM | fused deposition modeling |
| OD | outside diameter – vnější průměr |
| FTDI | Future Technology Devices International |
| MCLR | master clear pin |
| SQUAL | Surface quality – kvalita povrchu |

8. Seznam elektronických příloh

- Modely jednotlivých částí konstrukce
- Schéma upravené řídicí elektroniky
- Modely ovládání jednotlivých senzorů